专题：海洋观测探测与安全保障技术
Ocean Observation and Security Assurance Technology

引用格式：吴天元, 江丽霞, 崔光磊. 水下观测和探测装备能源供给技术现状与发展趋势. 中国科学院院刊, 2022, 37(7): 898-909.
Wu T Y, Jiang L X, Cui G L. Status and trends of energy power supply technologyies for underwater equipment. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(7): 898-909. (in Chinese)

水下观测和探测装备能源供给技术现状与发展趋势

吴天元[1†] 江丽霞[2†] 崔光磊[1*]
1 中国科学院青岛生物能源与过程研究所 青岛储能产业技术研究院 青岛 266101
2 中国科学院 重大科技任务局 北京 100864

摘要 在认知、探索海洋的过程中，水下观测和探测装备是海洋进入、海洋探测的必备设施，为海洋资源的开发与利用提供着技术保障，是我国实施海洋战略、建设海洋强国的重要抓手。然而，受限于当前能源供给水平，水下装备存在作业能力单一、单次续航时间短等问题，不能满足复杂工况下长期运行的需求。随着世界各国海洋资源开发与海疆防卫日趋白热化，“透明海洋”工程和海底工厂建设迫切需要建造智能化水下装备集群，亟须高能量密度、高安全、高可靠、长寿命的能源动力支撑。因此，我们要创新水下能源供给模式，构建“发、储、输、用”多能互补的强大的水下能源基站，攻克水下能源供给技术瓶颈，为智能化、集群化水下装备提供充足的能源动力，以更好地助力我国海洋强国建设。

关键词 水下装备，能源供给，智能化，集群化，水下能源基站，能源岛

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20220511001

1 水下观测和探测装备是发展海洋强国的攻坚利器

党的十八大以来，我国提出建设海洋强国的战略部署，要求提高海洋资源开发能力。2016年5月，习近平总书记在全国科技创新大会、两院院士大会、中国科协第九次全国代表大会上指出，“深海蕴藏着地球上远未认知和开发的宝藏，但要得到这些宝藏，就必须在深海进入、深海探测、深海开发等方面掌握关键技术”。深海战略“三部曲”明确了海洋强国的实施规划。2021年12月，《“十四五”海洋经济发展规划》[①]明确提出：优化海洋经济空间布局，加快构建

†同等贡献；*通信作者
资助项目：国家重点研发计划重点专项（2021YFC2800201），中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA22010600）
修改稿收到日期：2022年6月10日

① 国务院关于“十四五”海洋经济发展规划的批复. (2021-12-15)[2022-06-10]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-12/27/content_5664783.htm.

现代海洋产业体系，着力提升海洋科技自主创新能力，协调推进海洋资源保护与开发，维护和拓展国家海洋权益，加快建设中国特色海洋强国。

耕海探洋，装备先行。在认知、探索海洋的过程中，水下观测和探测装备是海洋进入、海洋探测的必备设施，为海洋资源的开发与利用提供基础保障，是发展海洋强国的攻坚利器。近年来，世界海洋强国纷纷加大在海洋基础设施和装备方面的战略部署，以期在未来海洋资源开发利用"争夺战"中抢占先机。美国发布《2030年海洋研究与社会需求的关键基础设施》，制定了关键基础设施的规划[1]；英国发布《全球海洋技术趋势2030》报告[2]，分析了商业运输、海军和海洋健康等方面未来技术趋势，并对海洋钻探船、科学考察船、水下机器人、水下滑翔机等海洋装备的作业时间、效率及可靠性提出了更高的要求。"十二五"以来，我国持续部署国家重点研发计划"深海关键技术与装备"重点专项，从"蛟龙号"、"深海勇士"号到"奋斗者"号，取得了一系列重大成果突破，关键技术也逐步实现国产化，这标志着我国已掌握了深海资源开发的攻坚利器。

2 水下观测和探测装备能源供给技术的国内外现状

众所周知，水下装备的能源供给水平直接决定了其作业能力和续航时间。目前，水下装备动力能源通常以化学电源为主，包括铅酸、银锌、锂电池和燃料电池等，主要性能指标详见表1。受限于水下装备的体积、重量、可靠性等设计要求，自主水下潜航器（AUV）、水下遥控航行器（ROV）、深海载人潜水器（HOV）等深水装备的能源装载量受到极大的限制，导致作业时间和作业效率偏低，作业成本居高不下。因此，近年来持续提升水下装备的续航能力、延长作业时间和作业效率已成为世界海洋强国水下装备技术竞赛的焦点。

2.1 水下探路者——AUV和ROV等水下装备能源系统技术现状

AUV（图1）和ROV（图2）等水下无人航行器作为水下探索和作业的先锋，是观测、探测海洋的核心装备[3]。由于ROV需要人为操控，其工作效率和活动范围受到极大的限制，具有一定的局限性[4]；

表1　水下装备化学电源主要性能指标

Table 1　Main parameters of various chemical powers for underwater equipment

化学电源大类	小类	质量能量密度(Wh/kg)	体积能量密度(Wh/L)	充电时间(h)	循环寿命(次)	安全可靠性
铅酸蓄电池	开阀富液式	~25	~40	8—10	300	充电析出易燃易爆气体，维护烦琐
	阀控密封式	~45	~80	8—10	300	充电析出易燃易爆气体，维护简单
银锌蓄电池	二次电池	80—110	180—200	8—10	100	充电析出易燃易爆气体，维护烦琐
锂电池	锂亚硫酰氯一次电池	350—550	800—1000	/	/	一次电池，有爆炸隐患
	磷酸铁锂二次电池	120—180	320—350	2—3	＞500	免维护，较安全
	三元液态二次电池	180—270	360—750	2—3	＞500	免维护，有热失控隐患
	固态锂离子二次电池	220—400	450—850	3—5	＞500	免维护，高安全，深水耐压
	固态锂金属二次电池	400—550	900—1200	8—10	100—200	免维护，较安全，寿命较短
燃料电池	质子交换膜燃料电池	350—550	250—400	/	/	维护烦琐，可靠性差（需要电电混合使用）
	金属/海水燃料电池	500—700	500—700	/	/	高安全，输出功率小

AUV本体携带能源和自主导航，具有自主航行控制与作业能力，广泛用于海洋经济开发与海疆防卫。

ROV的能源供给来自母船电源或岸上电源，通过具有承载强度的多功能复合缆进行电力、通信的传输，其能源供给方式较为简单。而AUV的能源主要源自其所携带电源，其作业能力和安全性取决于所携带单体电池的能量密度和安全可靠性。AUV的一次电源主要采用质子交换膜燃料电池、金属海水燃料电池和锂亚硫酰氯电池，部分置于干舱内，其二次电源先后经历了铅酸蓄电池、银锌蓄电池、锂离子电池等阶段。



图 1 "潜龙一号"自主水下潜航器
Figure 1 "Qianlong 1" autonomous underwater vehicles



图 2 "海星 6000"水下遥控航行器
Figure 2 "Haixing 6000" remotely operated vehicle

早期的AUV二次电源大多采用铅酸蓄电池。1994年，我国首台水下自主航行器"探索者"号问世，采用充油铅酸蓄电池，下潜深度1 000 m[5]。20世纪90年代，银锌蓄电池一度成为AUV的主流动力电源，美国先进无人搜索系统（AUSS）、韩国OKPL-6000、加拿大Theseus[6]、中国"CR-01"[7]等均采用银锌蓄电池。由于银锌蓄电池存在充电速度慢、寿命短、成本高、充电析出易燃易爆气体等缺点，陆续被锂电池替代。中国"潜龙一号"、美国LMRS、Bulefin-9、法国Alister 3000[8]等AUV均搭载锂离子动力能源。美国REMUS-6000 AUV[9]使用Saft公司研制的锂离子电池组作为动力电源，最大工作水深达6 000 m。2015年，中国科学院沈阳自动化研究所研制的6 000 m"潜龙一号"搭载锂电池动力系统，最大续航24 h[10]，标志着我国深海AUV技术达到国际先进水平。深海燃料电池主要包括质子交换膜燃料电池和金属海水燃料电池，能量密度超过400 Wh/kg，具有高能效、快启动、无污染等特点[11]。美国"海马""桑塔"、挪威Hugin 3000、德国Deep C、日本Urashima等应用了燃料电池。挪威Hugin 3000携带45 kWh铝海水燃料电池，续航能力达到60 h，一次续航440 km[12]。德国Deep C采用质子交换膜燃料电池，续航时间60 h，一次续航400 km，航速60 kn②[13]。2020年，中国科学院大连化学物理研究所成功研制出镁海水燃料电池系统，最大下潜深度3 252 m，累计作业时间为24.5 h，累计供电达3.4 kWh（图3）。

尽管金属海水燃料电池具有更高的能量密度，但由于海水中的溶解氧浓度低，导致其输出功率低，无法满足AUV的瞬时高功率作业需求，作为唯一能源应用时仅适用于水下长期观测设备的能源供给。锂离子电池具有长寿命、高功率等优势，目前仍为AUV的主流能源动力，符合具有水下隐蔽持续能源补给能力的智能

② 1 kn 约为 1.852 km/h

化AUV集群发展需求。而由金属海水燃料电池、锂离子电池组成的一次、二次组合能源系统则为兼顾长续航和高动力性能的单兵AUV提供了可靠的能源支撑。

2.2 科考重器——HOV能源系统应用现状

HOV主要用于执行深水考察、海底勘察与资源开发、深海打捞与救生等作业任务，是海洋资源探索与开发的科考重器。1960年1月，美国“迪里亚斯特”载人潜水器下潜至马利亚纳海沟，最大潜水深度达10 916 m，开启了人类万米深潜之旅。但该潜水器采用铅酸蓄电池，仅用于驱动螺旋桨、舵等小型动力装置，以实现水下姿态的微调和抛载，尚不具备海底勘探和采样作业能力[14]。

目前，世界上拥有6 000 m级HOV的国家有美国、中国、日本、法国和俄罗斯。法国“鹦鹉螺号”HOV采用铅酸电池[15]，能量密度为~25 Wh/kg，下潜深度6 000 m；我国“蛟龙号”（图4a）则采用银锌电池[16]，能量密度为~55 Wh/kg，最大下潜深度7 020 m。这两种电池均存在能量密度低、重量大、维护烦琐等问题，已被世界先进国家摒弃[17]。美国“阿尔文”号和日本“深海6500”号HOV装备了锂离子电池，能量密度达~130 Wh/kg，其下潜深度分别为4 500 m和6 500 m，单次作业时间为6—10 h[18]（表2）。

近年来，在国家重点研发计划和中国科学院战略性先导科技专项的支持下，我国HOV开启了国产化和锂电化的新征程。2017年，我国4 500 m“深海勇士号”载人潜水器问世，搭载120 Wh/kg磷酸铁锂电池，海底作业时间约6 h。2020年，我国“奋斗者号”载人深潜器（图4b）顺利完成万米海试，搭载135 Wh/kg锂离子电池，最大载人深潜10 909 m，最大作业时间约10 h，具有强大的勘察、探测等作业能力。HOV动力的发展趋势显示，持续提升能量密度、深水耐压性能，同时延长潜水作业时间是世界各国水下装备发展的刚性需求。

而固态锂电池采用固态电解质替代传统液态电解液，不仅具有耐深水高压特性，在显著提升能量密度的同时，还具有本征安全性，是HOV动力能源的理想选择。

3 水下观测和探测装备智能化、集群化发展趋势引发深水能源系统供给技术革命

随着海洋资源开发进程的提速，单一装备的作业

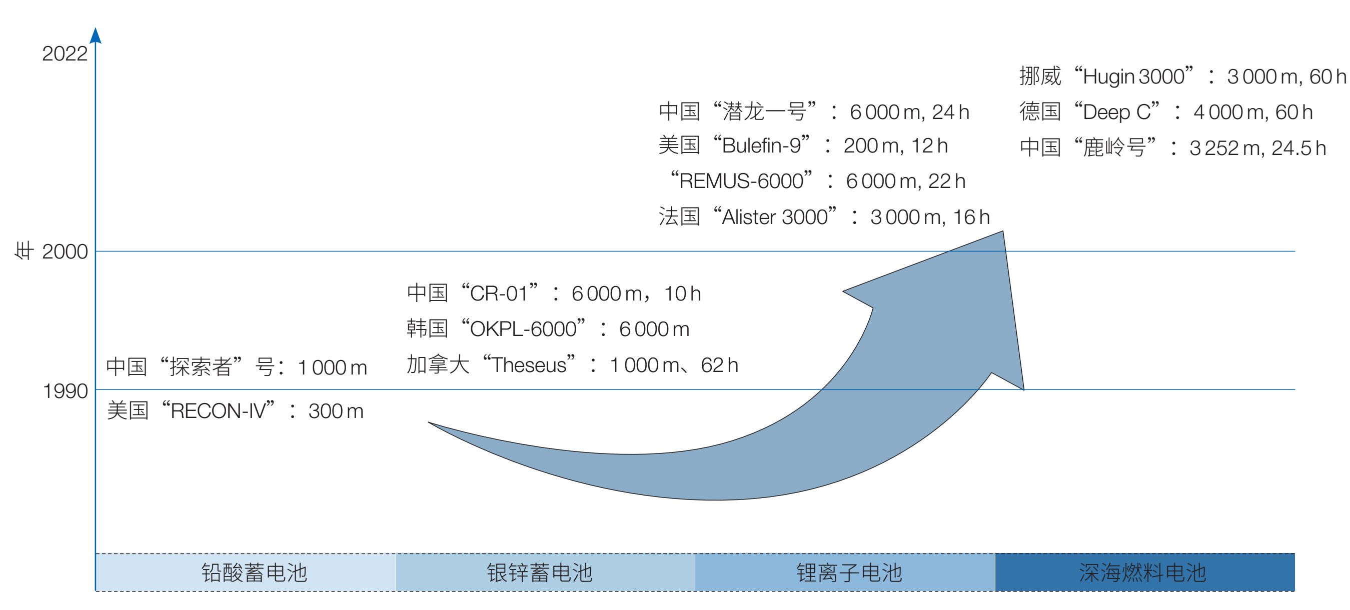


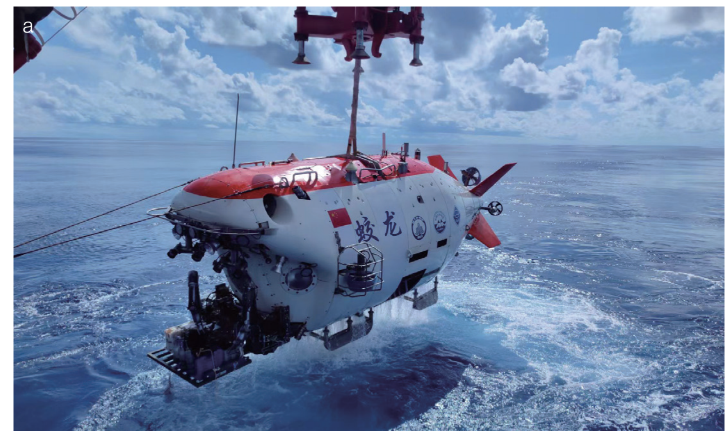
图3　不同能量动力AUV续航能力及作业深度

Figure 3　Endurance capability and operational depth of AUV powered by different energy sources

表2 不同深海载人潜水器性能作业指标比较

Table 2 Operation performance of varied HOV powered by different energy sources

主要指标	法国“鹦鹉螺”号	中国“蛟龙”号	美国“阿尔文”号	日本“深海6500”号	中国“深海勇士”号	中国“奋斗者”号
动力能源类型	铅酸蓄电池	银锌蓄电池	锂离子电池	锂离子电池	磷酸铁锂电池	磷酸铁锂电池
最大下深度（m）	6 000	7 000	4 500	6 500	4 500	11 000
水下作业时间（h）	5	8	4	8	6	10



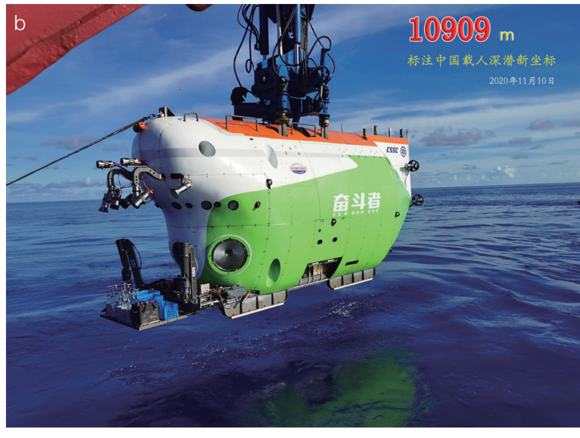


图 4 我国“蛟龙”号深海载人潜水器（a）和“奋斗者”号深海载人潜水器（b）

Figure 4 China’s “Jiaolong” manned submersible (a) and “Fendouzhe” manned submersible (b) which marked new benchmark of China’ manned depth

能力已不能满足“透明海洋”工程与“海底工厂”的建设需求，水下装备已呈现智能化与集群化发展趋势 [19,20]。而以海上风能、太阳能、波浪能、潮汐能、海流能、温差能、盐差能等形式存在的海洋能源具有蕴藏量巨大、可再生、清洁环保等优势，成为新时期亟待开发的战略性清洁能源。中国科学院广州能源研究所继 2019 年完成我国首台波浪能供电观测浮标“海聆”应用示范后，持续开发出 10 W、60 W、100 W、200 W、300 W、1 kW 等多种型号的小型波浪能供电装置，为浮标、航标灯及一些小型装置做原位供电，满足差异化海域及原位观测仪器设备的电力需求，为我国海洋观测系统建设提供技术与装备支撑。2020 年 8 月，中国科学院广州能源研究所设计的“南海兆瓦级波浪能示范工程建设”500 kW 鹰式波浪能发电装置“舟山号”建成交付，开启了珠海市大万山岛的应用示范。

由于受到气候、洋流、深度等因素影响，现有海洋能源的发电装置电力输出存在间歇性、功率不稳定、效率低、成本高、经济效益差及一些技术问题，尚不能直接对海洋装备进行高效、可靠的能量补给。因此，如何实现电能在深海装备中的持续稳定传输、储存与供给，提高深海装备的作业效率和作业能力，保障深海装备集群长期、可靠的复杂工况下长潜伏运行，是制约深海装备智能化发展的瓶颈。

3.1 高能量密度、高安全储能系统可大幅提升水下装备的单次续航及作业能力

水下装备单次续航及作业能力受限于自携电源的能量密度和运行工况。常规电池的质量比能量低，在同样的荷载条件下，携带更多的能量将导致该装备自身质量的大幅增加，进而需要通过匹配更多的浮力材料进行系统总体优化，最终会带来自身重量大、起吊布放与回收困难等问题，极大地制约了水下装备在复

杂工况下的荷载能力与智能化水平。因此，持续提升深水复杂工况下的能量密度、安全性及寿命是水下装备储能电源的发展要素。

固态锂电池兼顾高能量密度、高安全、深水耐压等优势，理论能量密度超过 450 Wh/kg，是商品化锂电池的 2—3 倍，是深海储能的理想选择。在中国科学院战略性先导科技专项“深海/深渊智能技术及海底原位科学实验站”、国家重点研发计划相关项目等支持下，中国科学院青岛生物能源与过程研究所首创“刚柔并济”技术路线[21-24]，采用固态聚合物电解质替代液态电解液，打通原位固态化工艺[25-28]，研制出自主知识产权的聚合物固态锂电池，成功实现深海电源系统研发与示范应用，为中国科学院深海科学与工程研究所研制的“万泉”“天涯”“金鸡”“沧海”“鹿岭”等深海装备提供充足的能源动力，于 2017、2018、2019 年连续 3 年实现 10 901 m 全深海示范应用、26 天单次下潜持续最长作业、198 天持续无故障运行等示范新突破。5 年内，固态锂电池能源系统实现零故障深海示范运行，表明我国高能量密度深海电源技术已趋于成熟，为超大容量深海能源基站的构建夯实了技术基础。

3.2 构建大型高安全储能基站可为水下装备集群化作业提供充足的能源动力

为满足深海装备智能化与集群化发展，水下高隐蔽、长潜伏、满足复杂工况的大容量储能基站技术研发和建设迫在眉睫，此类技术在国际上鲜有报道。面临的主要难题有：深水复杂工况、超大容量、深水压力、长期潜伏、系统自放电、瞬时高功率等。为解决以上难题，中国科学院于 2018 年率先部署了战略性先导科技专项（A 类）“深海/深渊智能技术及海底原位科学实验站”，针对深水发电、储电、输电和用电，进行了能源关键技术研发与应用全链条布局，提出构建以全海深固态储能系统为储能枢纽，以海洋能、微型核能、温差能、金属燃料电池等为发电系统，以深海智能装备为用电系统的“发、储、输、用”多能互补的大容量模块化全海深能源基站[29,30]（图 5）。创新深海无线充电技术，实现从“储”到“用”的高效供给，大幅提升水下作业时间和效率，从根本上解决了深海装备的能源供给瓶颈。

以上专项研究内容中，部分工作已在国家重点研发计划“深海和极地关键技术与装备”重点专项中获得“延续性”支持，如深海核能、深海大容量储能系统已在 2021 年完成首批立项。

3.3 高能效水下无线充电系统保障水下能源基站至水下装备的能源传输

如何实现电能的高效传输是制约水下能源基站发展的另一瓶颈。深海装备所需电能一般通过母船电缆

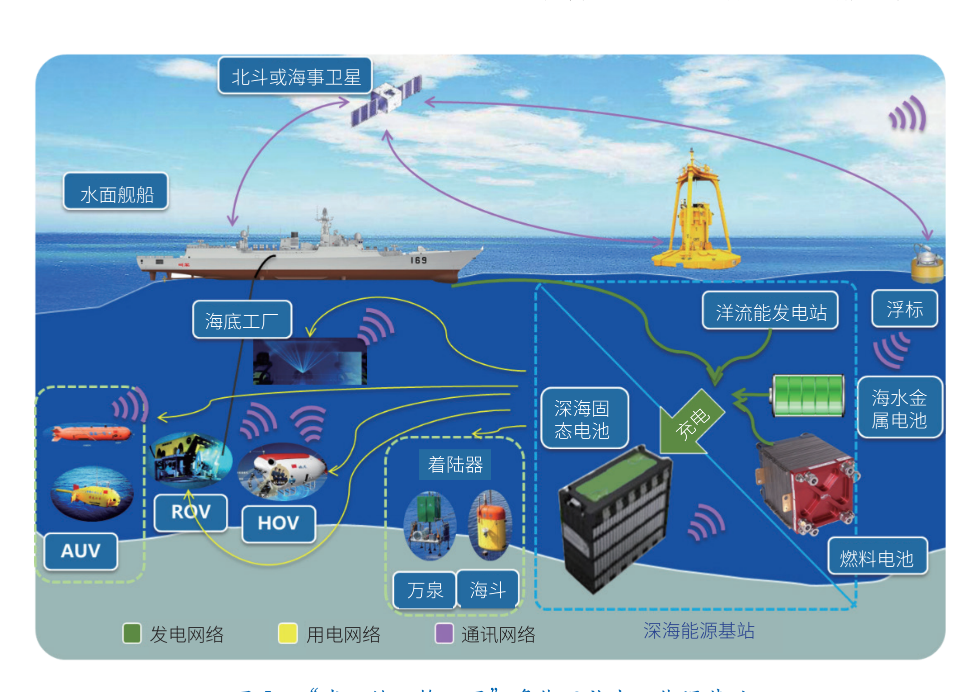


图 5 “发、储、输、用”多能互补水下能源基站

Figure 5 Underwater multi energy station integrating “generation, storage, transmission and use” grids

进行水下或船面补给。水下补给采用被世界少数国家所垄断的湿插拔技术[31]，该方式存在安装难度大、操作困难、接口易磨损等问题，能量补给成本高、效率低。水下无线充电是一种非接触式能量传输技术，通过电磁耦合实现高隐蔽可靠的能量传输，满足水下装备智能化、长潜伏与集群化的补给需求。

无线充电技术已在电动汽车、家用电器领域得到广泛应用，其水下应用仍处于试验探索阶段，需持续开展长期可靠性验证。中国科学院电工研究所研制出两套面向深海 4 500 m 和深渊万米平台需求的无线充电系统，设计功率最大 1 kW，效率达到 81%，通过了 127 MPa 模拟压力环境测试，完成了 AUV 系统和坞站集成与联调试验。目前水下无线充电技术面临的主要挑战有：水下无线充电的效率、大功率无线充电的海水涡流损耗、长期运行可靠性、长潜伏的安全性与隐蔽性等。

3.4 构筑深远海“能源岛”，为舰船、岛礁、海上平台、海洋牧场、水下储能基站、水下装备等提供能源和支撑

近年来，为了实现“双碳”目标，世界各国均加快可再生能源的开发与规模化利用。我国《“十四五”可再生能源发展规划》明确提出，“十四五”末可再生能源发电量增量在全社会用电量增量中的占比超过 50%。大力发展海上风电、光电，创新能源供给模式，成为我国东部沿海地区实现“能源结构转型”的重要举措，其海上风光等发电选址均在近海。由于受生态环境保护、海上交通航道占用等因素影响，近海风电站址资源日趋紧张，而深远海风能具有风速更高、风向更为稳定等显著优势，更加适于大容量、长风时、高效率的风电场建设。

2021 年，丹麦能源署公布了建立“能源岛”（图 6）的计划，选址为距海岸线 80—120 km 的远海，每个漂浮式能源岛，海上风能、光电等可再生能源装机容量至少 10 GW，计划于 2050 年建成，其中一期规划 3 GW，将于 2030 年交付使用。由此可见，构筑深远海“能源岛”，将海上可再生能源资源的开发与利用场所由近海推向远海，一方面充分利用远海更好、更稳定的海上能源资源进行“冷热电储”，提升可再生能源资源的开发利用效率，另一方面将促进加快海上制氢等无人工厂建设，实现远海风、光等可再生能源高效利用。

此外，深远海“能源岛”可将远海能源补给蓝图变为现实，在远海即可实现对舰船、岛礁、海上平台、海洋牧场、水下储能基站及水下装备的能源供给，避免了大型装备需回港或回岸补充能源带来的各项损失，也大幅增强了水下作业的隐蔽性。与此同时，“能源岛”也为深远海通讯难这个“卡脖子”问题提供了新的解决方案。可以说能源岛的建设作为探索深远海域的跳板，每一个能源岛都可以作为一个中转站，“点亮”一片海域。由此可见，构筑深远海“能源岛”具有重大的能源战略价值，我国应加快布局并尽快启动，充分发挥多学科交叉融合优势，力争建成全球第一座深远海“能源岛”，进一步从岛到链，并形成集能源、信息、补寄为一体的重要平台，为舰船、岛礁、海上平台、海洋牧场、水下储能基站、水下装备等提供充足的海面能源供给，这对我国经略海洋具有重大战略意义。

4 我国水下能源供给技术发展建议

“十二五”以来，我国持续部署重大项目，如国家重点研发计划“深海和极地关键技术与装备”重点专项、中国科学院战略性先导科技专项，在水下能源、通信、装备等领域开展了多轮次、全方位新兴前瞻技术部署，科技实力正在从量的积累迈向质的飞跃、从点的突破迈向系统能力提升，陆续实现核心关键技术国产化，取得了一系列突破性进展，为我国海洋经济发展、海疆防卫及国家海洋权益维护奠定了坚实的基础。然而，相比于发达国家，我国海洋经济还

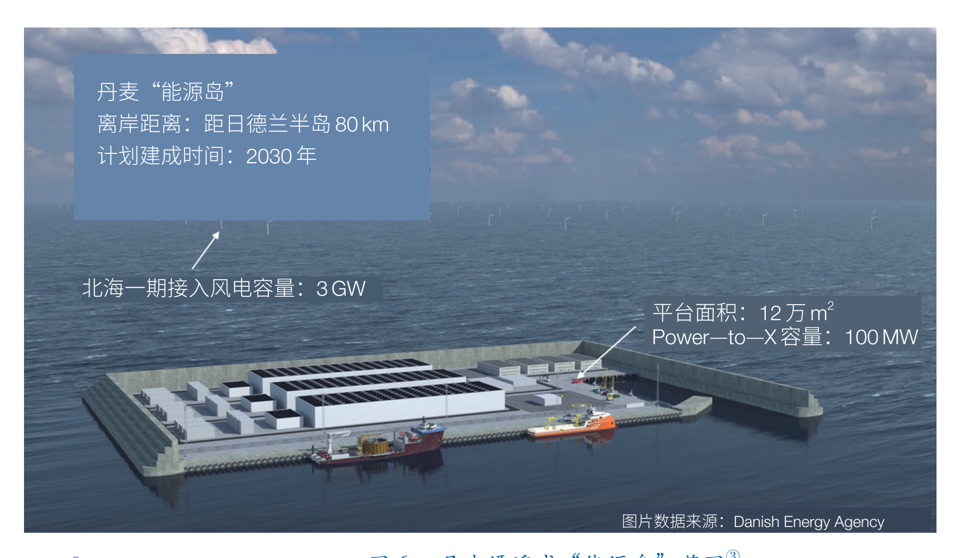


图 6　丹麦漂浮式“能源岛”蓝图③

Figure 6　Blueprint of Denmark’ floating energy island③

刚刚起步，海洋科技在原始创新能力、创新资源整合、创新力量布局、人才队伍与评价体系等方面尚显不足；海防任务依然艰巨，海流能、波浪能、潮汐能、温差能等技术尚未得以真正应用；海底勘察与探测作业能力仍需大幅提升，海底工厂也还处于概念阶段。

水下能源供给技术水平决定着海洋开发的步伐，掌控着海洋强国的发展命脉，持续创新水下新型能源技术，构筑取之不尽用之不竭的多能互补水下能源供给平台，将大幅促进水下装备的智能化进程，夯实海洋强国建设基础，助力我国早日实现海洋强国梦。

（1）技术层面。结合水下装备的应用工况，发展差异化的能源供给技术。对于一次性、低成本的智能感知设备，发展高能量密度、小型化、绿色无害能源技术；对于长期漂流式水下装备，需要发展稳定、缓释、可靠、适应广域温度的能源技术；对于固定的观探测设备，发展原位自主供能方案；对于各类移动式装备平台，水下能源基站或“能源岛”将是未来的首选方案。针对移动式智能化与集群化水下装备，积极布局具有高安全、高比能、高可靠等显著特点的发、储、输、用等水下核心能源输配电技术，持续优化多能互补的水下能源平台智能化集成技术。在水下“发电”方向，就地取材，发展差异化水下发电技术：常规海域发展多层次海洋能一次发电技术，如潮汐能、波浪能、海流能等机械能发电；冷泉、热液等区域充分利用海洋温差，开发温差能发电技术；加快探索深海微型核能技术的研制与示范；继续优化深海金属燃料电池，推进长效稳定的金属海水电池产品开发与工程化进程；进一步优化贮存式一次电池金属阳极合金，发展新型电解液辅助循环结构，创新激活式大功率原电池热管理系统，提升安全可靠性。在水下“储能”方向，聚焦电化学储能技术，持续挑战充油耐压二次电池的能量密度等核心技术指标。一方面继续大幅提升深海聚合物固态锂离子电池的重量能量密度，力争实现400 Wh/kg；另一方面，发展新型固态电解质，构筑适合锂金属及合金材料体系的高可靠界面，提升固态锂金属电池的循环寿命，实现 550 Wh/kg 以上高能量密度电池的长循环。在水下“输电”方向，重点突破水下大功率无线充电技术的传输效率和长期可靠性，揭示海水介质下的电磁耦合所引发的涡流损耗机制和变化规律，持续优化深水压力下的磁耦合机构，创新无线充电系统热管理，提高长期运行的可靠性。同时应进一步探索其水下工作特别是长潜伏的安全性与隐蔽性。在水下“用电”装备端，结合智能化装备的工况需求，研发差异化的深海充油耐压二次电源系统，持续优化深海高可靠电池管理技术和轻量化充油耐压一体化集成技术，大幅提升系统能量密度。在水面能源供给方面，加强海上综合能源开发与利用，重点加

③ 丹麦能源署副署长：通过大规模海上风电和能源岛实现丹麦 2050 年零碳目标 . (2020-10-19)[2022-06-01]. http://www.chinapower.com.cn/tanzhonghe/dongtai/2021-10-19/108743.html.

快悬浮式海上基地建设，攻克海上风光高效发电、海水制氢、CO_2转化合成燃料等无人制造关键技术，构建风能、太阳能、氢能、波浪能、潮汐能、海流能、温差能、盐差、海水淡化及海洋牧场等综合能源集成的海上“能源岛”，实现深远海通信、各种能源水面供给及高效利用。

（2）政策层面。聚焦国家重大需求，凝聚国家战略科技力量，建立深海能源技术研究高地。关注基础研究与工程化应用技术的衔接，鼓励产业化技术孵化，健全分类评价与人才晋升机制，制定水下高比能电池、水下无线充电、微型核能等技术研发及产业化激励政策，鼓励水下能源平台建设。推进落实产、学、研、金、服、用一体化融合发展机制，激励构建新时期海洋研产联合体，打造海洋创新创业共同体，建立以目标为导向的海洋领域产业联盟，加速具有自主知识产权的核心关键技术产业化进程。

（3）体制层面。强化顶层设计，优化力量统筹，破“旧制”，立“新规”。打破传统海洋“圈子”，去除海洋领域“围墙”，海纳百川，汇聚多方智慧，构建跨学科、跨单位、跨系统的一体化深度融合的项目研发机制，鼓励国内顶尖工程技术力量进入海洋，聚焦深海能源核心难题，建立由科学院、高校、企业等组成的协同攻关创新团队，锐意进取，突破关键技术，共享创新成果，为国家海洋强国建设与海疆防卫提供能源技术保障。

（4）平台建设层面。聚焦海洋领域高质量发展需求，加快推进并完善海洋领域平台建设，倡导“开放”“共享”“合作”，鼓励协同创新，构建我国海洋领域大型基础设施和海洋大数据共享平台，打破大型仪器设备及海洋基础设施的系统化、单位化、小集体化现象，实现国内海洋领域平台、数据等资源共享，提高其使用效率，充分发挥其科研价值和社会价值，形成强大协同的前瞻探索能力、应用技术创新能力以及产业化推动能力，为海洋科技振兴、国家海疆安全和海洋经济发展提供坚实的关键设施保障。

致谢　中国科学院电工研究所王秋良、孔力、王一波，中国科学院理化技术研究所王越超，中国科学院重大任务局陈海生，中国科学院深海科学与工程研究所丁抗、蒋磊，以及中国科学院声学研究所谭鹏等对论文提出了许多宝贵的意见和建议，在此一并表示衷心感谢！

参考文献

1 高峰, 王辉, 王凡, 等. 国际海洋科学技术未来战略部署. 世界科技研究与发展, 2018, 40(2): 113-125.
Gao F, Wang H, Wang F, et al. Future strategic deployment of international marine science and technology. World Sci-Tech Research & Development , 2018, 40(2): 113-125. (in Chinese)

2 郎舒妍, 曾晓光, 赵羿羽. 2030：全球海洋技术趋势. 中国船检, 2017, (6): 90-92.
Lang S Y, Zeng X G, Zhao Y Y. 2030: Trends of Global Marine Technology. China Ship Survey, 2017, (6): 90-92. (in Chinese)

3 赵羿羽, 曾晓光, 郎舒妍. 深海装备技术发展趋势分析. 船舶物资与市场, 2016, (5): 42-45.
Zhao Y Y, Zeng X G, Lang S Y. Analysis on the development trend of deep sea equipment technology. Marine Equipment/Materials & Marketing, 2016, (5): 42-45. (in Chinese)

4 李一平, 李硕, 张艾群. 自主/遥控水下机器人研究现状. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2016, 8(2): 217-222.
Li Y P, Li S, Zhang A Q. Research status of autonomous & remotely operated vehicle. Journal of Engineering Studies, 2016, 8(2): 217-222. (in Chinese)

5 王俊娴, 吴金友. 我国“探索号”机器人首创深潜1000 m记录. 海洋开发与管理, 1995, 12(1): 74.
Wang J X, Wu J Y. China’s “Exploration” robot sets the record for the first deep dive of 1000 m. Ocean Development and Management, 1995, 12(1): 74. (in Chinese)

6 Butler B, den Hertog V. Theseus: a cable-laying AUV//Proceedings of OCEANS’ 93. Victoria: IEEE, 1993: I210-I213.

7 李一平, 封锡盛. “CR-01”6000 m自治水下机器人在太平洋锰结核调查中的应用. 高技术通讯, 2001, 11(1): 85-87.

Li Y P, Feng X S. Application “CR-01” autonomous underwater vehicle to the investigation of manganese nodules in the Pacific Ocean. Chinese High Technology Letters, 2001, 11(1): 85-87. (in Chinese)

8 Kermorgant H A, Scourzic D. Interrelated functional topics concerning autonomy related issues in the context of autonomous inspection of underwater structures// Europe Oceans 2005. Brest: IEEE, 2005: 1370-1375.

9 Purcell M, von Alt C, Allen B, et al. New capabilities of the REMUS autonomous underwater vehicle// OCEANS 2000 MTS. Providence: IEEE, 2000: 147-151.

10 刘健, 徐会希. 潜龙一号: 深海里的中国龙. 科技纵览, 2014, (6): 92-93.
Liu J, Xu H X. Qianlong No.1: Chinese dragon in the deep sea. IEEE Spectrum, 2014, (6): 92-93. (in Chinese)

11 Mendez A, Leo T, Herreros M. Current state of technology of fuel cell power systems for autonomous underwater vehicles. Energies, 2014, 7(7): 4676-4693.

12 Warren D, Church R, Davey R. Discovering H.M.S. Ark Royal. Hydro International, 2004, 8(7): 28-30.

13 荆有泽, 刘志伟. UUV用动力电池现状及其发展趋势. 电源技术, 2019, 43(6): 1073-1076.
Jing Y Z, Liu Z W. Current situation and development trend of power battery for UUV. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(6): 1073-1076. (in Chinese)

14 赵羿羽. 万米级潜水器现状及发展重点. 中国船检, 2018, (9): 76-81.
Zhao Y Y. Status and development emphasis of 10 000-meter submersibles. China Ship Survey, 2018, (9): 76-81. (in Chinese)

15 Jarry J. NAUTILE’s (SM97) first year: The results of the tests and of the first operational dives// OCEANS ’85 - Ocean Engineering and the Environment. San Diego: IEEE, 1985: 990-992.

16 崔维成. “蛟龙”号载人潜水器关键技术研究与自主创新. 船舶与海洋工程, 2012, 1: 1-9.
Cui W C. Key technologies and self innovation of “JIAOLONG” manned submersible. Naval Architecture and Ocean Engineering, 2012, 28(1): 1-8. (in Chinese)

17 霍海波, 郭明, 崔维成, 等. 深海潜水器电源系统的研究现状分析. 电源技术, 2017, 41(8): 1232-1235.
Huo H B, Guo M, Cui W C, et al. Status analysis of power system for deep-sea submersible. Chinese Journal of Power Sources, 2017, 41(8): 1232-1235. (in Chinese)

18 戴国群, 陈性保, 胡晨. 锂离子电池在深潜器上的应用现状及发展趋势. 电源技术, 2015, 39(8): 1768-1772.
Dai G Q, Chen X B, Hu C. Current status and development trend of lithium-ion battery in underwater vehicle. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(8): 1768-1772. (in Chinese)

19 吴有生, 赵羿羽, 郎舒妍, 等. 智能无人潜水器技术发展研究. 中国工程科学, 2020, 22(6): 26-31.
Wu Y S, Zhao Y Y, Lang S Y, et al. Development of autonomous underwater vehicles technology. Strategic Study of CAE, 2020, 22(6): 26-31. (in Chinese)

20 李硕, 刘健, 徐会希, 等. 我国深海自主水下机器人的研究现状. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(9): 1152-1164.
Li S, Liu J, Xu H X, et al. Research status of autonomous underwater vehicles in China. Scientia Sinica (Informationis), 2018, 48: 1152-1164. (in Chinese)

21 Zhang J J, Zhao J H, Yue L P, et al. Safety-reinforced poly(propylene carbonate)-based all-solid-state polymer electrolyte for ambient-temperature solid polymer lithium batteries. Advanced Energy Materials. 2015, 5: 1501082.

22 Zhang J J, Zang X, Wen H J, et al. High-voltage and free-standing poly(propylene carbonate)/ $Li_{6.75}La_3Zr_{1.75}Ta_{0.25}O_{12}$ composite solid electrolyte for wide temperature range and flexible solid lithium ion battery. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 5(1): 4940-4948.

23 Wang Y T, Ju J W, Dong S M, et al. Facile design of sulfide-based all solid-state lithium metal battery: In situ polymerization within self-supported porous argyrodite skeleton. Advanced Functional Materials, 2021, 31(28): 2101523.

24 Yan Y Y, Ju J W, Dong S M, et al. In situ polymerization permeated three dimensional Li^+-percolated porous oxide ceramic framework boosting all solid-state lithium metal battery. Advanced Science, 2021, 8(9): 2003887.

25 Chai J C, Liu Z H, Ma J, et al. In situ generation of poly (vinylene carbonate) based solid electrolyte with interfacial stability for $LiCoO_2$ lithium batteries. Advanced Science, 2017, 4(2): 1600377.
26 Wang C, Zhang H R, Dong S M, et al. High polymerization conversion and stable high-voltage chemistry underpinning an in situ formed solid electrolyte. Chemistry of Materials, 2020, 32(21): 9167-9175.
27 Lv Z L, Zhou Q, Zhang S, et al. Cyano-reinforced in situ polymer electrolyte enabling long-life cycling for high-voltage lithium metal batteries. Energy Storage Materials, 2021, 37: 215-223.
28 Wu H, Tang B, Du X F, et al. LiDFOB initiated in situ polymerization of novel eutectic solution enables room-temperature solid lithium metal batteries. Advanced Science, 2020, 7(23): 2003370.
29 崔光磊, 吴天元, 辛云川, 等. 一种深海能源基站及其运行方法: 中国, CN201911099729.8. 2020-02-04.
Cui G L, Wu T Y, Xin Y C, et al. A deep-sea energy station and its operation method: China, CN201911099729.8. 2020-02-04. (in Chinese)
30 崔光磊, 吴天元, 辛云川, 等. 一种多电源系统及其运行方法： 中国, CN202011508509.9. 2020-02-04.
Cui G L, Wu T Y, Xin Y C, et al. A multi-power system and operation method there of: China, CN202011508509.9. 2020-02-04. (in Chinese)
31 Xiang X B, Niu Z M, Lapierre L, et al. Hybrid underwater robotic vehicles: The state-of-the-art and future trends. HKIE Transactions, 2015, 22(2): 103-116.

Status and Trends of Energy Power Supply Technologyies for Underwater Equipment

WU Tianyuan[1†] JIANG Lixia[2†] CUI Guanglei[1*]
（1 Qingdao Industrial Energy Storage Research Institute, Qingdao Institute of Bioenergy and Processes Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266101, China;
2 Bureau of Major R&D Programs, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China）

Abstract In the process of cognition and exploration of the ocean, underwater observation and detection equipment is the necessary facility to enter and detect the ocean. These types of equipment provide technical support for the development and utilization of marine resources and is an important grip for the implementation of China's marine strategy and the construction of a strong marine country. However, limited by the current level of energy supply, the underwater equipment has problems such as single operation capacity and short single endurance time, which cannot meet the needs of long-term operation under complex working conditions. As the development of marine resources and the defense of sea frontiers in various countries in the world are becoming more and more intense, the construction of transparent marine engineering and submarine factories urgently need to build intelligent underwater equipment clusters, and urgently need energy and power support with high energy density, high safety, high reliability, and long life. Therefore, we need to innovate the underwater energy supply model, build a powerful underwater energy base station with multiple complementary functions of "generating, storing, transmitting, and using", and overcome the technical bottleneck of underwater energy supply, Providing sufficient energy and power for intelligent and clustered underwater equipment to better assist the construction of China's marine capability.

Keywords underwater equipment, energy supply, intelligent, clustering, underwater energy station

† Contributed equally to this work
*Corresponding author



吴天元　中国科学院青岛生物能源与过程研究所正高级工程师。主要研究领域：储能技术与工程、深海能源系统。主持国家重点研发计划“深海和极地关键技术与装备”重点专项、中国科学院战略性先导科技专项（A类）、中国科学院重点部署项目、海南省重大科技计划项目等多项重大项目。E-mail: wuty@qibebt.ac.cn

WU Tianyuan　Senior Engineer of Qingdao Institute of Bioenergy and Processes Technology, Chinese Academy of Sciences (CAS). His research focuses on energy storage technology and engineering. In recent years, he has mainly undertaken a number of major projects sponsored by the National Key Research and Development Program of China, the Strategic Priority Research Program of the CAS, the Key Deployment Projects of the CAS, Hainan Provincial Major Science and Technology Projects, and so on. E-mail: wuty@qibebt.ac.cn



江丽霞　中国科学院重大科技任务局海洋技术处副研究员。主要研究领域为工程热物理、动力工程与控制、清洁能源技术、海洋和能源领域交叉战略研究等。共发表科研、管理论文近40篇，执笔或主要参与撰写科研报告30余篇、执笔或主要参与撰写科研管理报告100余篇，获省部级奖励1项。E-mail: lxjiang@cashq.ac.cn

JIANG Lixia　Associate Professor of Bureau of Major R&D Programs, Chinese Academy of Sciences (CAS). In 2000, she received her Ph.D. from Institute of Engineering Thermophysics. Her major fields focus on thermophysics, power engineering and control, clean energy utilization, and the development strategy of crossing section of ocean and energy technology. Nearly 40 papers about academic and management were published in authoritative journals, and more than 30 research reports along with more than 100 management reports were accomplished, 1 provincial/ministerial award was achieved. E-mail: lxjiang@cashq.ac.cn



崔光磊　中国科学院青岛生物能源与过程研究所研究员、博士生导师。主要研究领域：高比能固态电池关键材料和系统、深海特种电源、固态光电转换器件等。国家新能源汽车专项高比能固态锂电池技术项目首席科学家，国家杰出青年科学基金获得者，国务院特殊津贴专家。主持国家重点研发计划、中国科学院战略性先导科技专项、国家自然科学基金杰出青年基金、国家自然科学基金联合基金等多项重大项目。获山东省自然科学奖一等奖、青岛市自然科学奖一等奖等奖项。
E-mail: cuigl@qibebt.ac.cn

CUI Guanglei　Professor and Doctoral Supervisor of Qingdao Institute of Bioenergy and Processes, Chinese Academy of Sciences (CAS). He is the leading scientist of the National Key R&D Program (high energy density solid state lithium batteries technology) and the State Council special allowance expert, He was awarded the Taishan Scholar of Shandong Province in 2015, the National Science Fund for Distinguished Young Scholars in 2016, Young and Middle-aged Leading Scientists, Engineers and Innovators in 2018, Ten Thousand Talent Program in 2019. His research focuses on the key materials and systems of high energy solid-state battery, special energy supply technology in deep sea, solid-state photoelectric converter, etc. In recent years, he has mainly undertaken a number of major projects sponsored by the National Key R&D Program of China, the Strategic Priority Research Program of the CAS, the National Science Fund for Distinguished Young Scholars, the National Natural Science Foundation of China, and so on. He has won the first prize of Natural Science in Shandong Province and the first prize of Natural Science in Qingdao.
E-mail: cuigl@qibebt.ac.cn

■责任编辑：张帆